

ソーシャルフォースモデルを用いた避難シミュレーションにおける事前出口把握及び誘導の効果

杉山裕¹, 宮川大樹¹, 一ノ瀬元喜²

¹ 静岡大学 大学院総合科学技術研究科 工学専攻 数理システム工学コース,

² 静岡大学 学術院工学領域 数理システム工学系列

概要

避難において、複数の出口を効率的に使うことは避難時間を短縮するために効果的な手段である。先行研究では、避難エージェントが出口の情報伝達を行うソーシャルフォースモデルによって、各出口の密度が均一化され、避難時間が短縮できることが明らかにされた。しかし実際には、互いに出口の情報を共有するだけでなく、出口の情報を事前に知っておくことも避難に効果的である。加えて、出口を把握している人が避難誘導を行えば、情報を持たない他の人たちも素早く避難することができる。そこで本研究では、ソーシャルフォースモデルによる避難シミュレーションを拡張して、事前出口把握と避難誘導が避難時間に与える影響を検証した。その結果、事前出口把握によって出口利用がより効率化し、避難時間が短縮した。更に、避難誘導は事前に出口を把握している人の割合が少ないときに最も効果が発揮されることがわかった。

Effects of preliminary knowledge for exits and guidance on evacuation in a social force model

Yu Sugiyama¹, Daiki Miyagawa¹, Genki Ichinose¹

¹ Department of Mathematical and Systems Engineering, Shizuoka University

Abstract

In evacuation, efficient use of multiple exits is an effective way to shorten the evacuation time. A previous study used a social force model where the information of exits among agents is shared. It showed that the density of each exit becomes uniformed, and then the evacuation time decreases. However, in a real situation, it is necessary for people to know the information of exits in advance as well as to share the information with each other. Also, if people who know the information in advance guide the evacuation, the whole people can evacuate quickly. In this study, we examined the effects of preliminary knowledge for exits and evacuation guidance on evacuation simulations using a social force model. The results showed that such knowledge improved the efficiency of exit use and shortened the evacuation time. Moreover, the evacuation guidance was most effective when the fraction of people who has preliminary knowledge of exits is small.

1 はじめに

避難シミュレーションにおいて、複数の出口をいかに効率的に使うかは重要な問題である [1]。ソーシャルフォース (SF) モデル [2-4] を用いた研究では、周囲の人間と出口の情報を伝達し合うことで複数の出口をより効率的に利用できることが明らかになっている [5]。

もし情報伝達だけでなく事前に出口の場所と幅を

把握できている人がいれば、その人達は最適な避難ができるだろう。更にはその人たちが誘導することによって、全体の避難時間の短縮も期待できる。しかし、そのような影響についてはまだ研究されていない。そこで本研究では、情報伝達を行う SF モデルを拡張して事前出口把握と避難誘導を導入し、避難シミュレーションにより避難時間への影響を検証する。

2 モデル

本研究では、情報伝達を行う SF モデル [5] に事前出口把握と避難誘導を導入した避難モデルを構築しシミュレーションを行う。事前出口把握とは、避難開始時点で既に正確な出口の情報（位置と幅）を持っている事を表し、避難誘導は事前に出口を把握している避難エージェントが他のエージェントに対して適切な出口を示すことを表す。本モデルでは、エージェントは目指す方向へ向かう力、他エージェントからの反発力、壁から受ける反発力の3つの力に基づいた運動方程式に従って避難を行う。事前出口把握と避難誘導は1つ目の目指す方向へ向かう力に反映される。以下ではそれぞれの力について説明する。

2.1 目指す方向へ向かう力

目指す方向へ向かう力とは、エージェントが避難するために向かわなければならない方向に自分の進行方向を修正しようとする力 \vec{F}_d' のことであり、以下の式を用いて表す。

$$\vec{F}_d' = e^{-\alpha_i} \vec{F}_d + (1 - e^{-\alpha_i}) \vec{F}_d^{ik} \quad (1)$$

ここで、 \vec{F}_d はエージェントが出口に向かうために働く修正力であり以下の式を用いて表す。

$$\vec{F}_d = m_i \frac{1}{\tau_i} (v_i^0 \vec{e}_i - \vec{v}_i) \quad (2)$$

m_i はエージェント i の体重、 τ_i はエージェント i に力が加わる時間、 v_i^0 はエージェント i の理想の速度、 \vec{e}_i はエージェント i の理想の進行方向、 \vec{v}_i は現在の速度を表す。理想の速度は、エージェントの初期設定の時点で速度 v^0 を平均とした標準偏差 σ の乱数で決定される [5]。理想の進行方向は、現在位置から選択した出口位置への方向ベクトルである。この力によって、エージェントは選択した出口の方向へ自分の進行方向を修正しようとする。

また、 \vec{F}_d^{ik} はエージェント i が近傍のエージェント k を追従しようとする力であり、以下の式を用いて表す。

$$\vec{F}_d^{ik} = m_i \frac{1}{\tau_i} (v_i^0 \vec{e}_{ik} - \vec{v}_i) \quad (3)$$

ここで \vec{e}_{ik} は現在におけるエージェント i から近傍のエージェント k への単位方向ベクトルである。近傍のエージェントをどのように選択するかは後述する。

式 (1) において α_i はエージェント i の情報の伝達回数を表している。エージェント i が出口を直接認識している場合を $\alpha_i = 0$ とする。出口を認識していない場合は近傍のエージェント k から情報伝達によって出口の情報と共に近傍のエージェント k の α_k を受け取り、その値に1加算した数値がエージェ

ント i の α_i となる。 α_i が大きい時、エージェントが持っている情報は多くの人を経由したものであり不確かなものになっている可能性が高い。このため、そのようなエージェントは近傍のエージェントとして選択されにくくなる。

事前出口把握はこの α_i に関わる。事前に出口を把握しているエージェントは初期状態でどの位置にいても最初から各出口までの距離と幅を考慮して以下の式で出口を選択することが出来るものとする。

$$E_i = \arg \min_x (d_{ix}^D w_x^C) \quad (4)$$

ここで、 E_i はエージェント i が選択する出口、 d_{ix} はエージェント i から出口 x までの距離、 w_x は出口 x の大きさとする。 D, C はそれぞれ出口までの距離と出口の大きさを評価するパラメータである。できるだけ最適な出口選択をできるように D, C を設定するため、事前に予備的な実験をした結果、本研究では $D = 1, C = -\frac{1}{2}$ とした。ここで選択した出口の情報は正確なものとして扱い、事前に出口を把握しているエージェントが現在どこに位置していたとしても式 (1) と式 (5) において $\alpha_i = 0$ とする。したがって事前に出口を把握しているエージェントは式 (1) において近傍のエージェントの影響は受けず $\vec{F}_d' = \vec{F}_d$ となる。

事前に出口を把握しているエージェントは自分を中心とした一定範囲内のエージェントに対して避難誘導を行うことができる。避難誘導されるエージェントは、誘導を受けて以降は、式 (4) を用いて出口を決定し、事前に出口を把握したエージェントと同様に $\vec{F}_d' = \vec{F}_d$ で力を受ける。

一方で、事前に出口を把握しているエージェントと誘導されたエージェント以外は近傍のエージェントからの影響を受ける。このようなエージェントは近傍のエージェントを選択するために、限定された視界内から以下に示す式で表されるエージェント i が目指している出口 x の情報量 S_i を元に判断する。

$$S_i = \frac{e^{-\alpha_i} (k_1 e^{-d_{ix}} + k_2 e^{-\rho x} + k_3 (1 - e^{-w_x}))}{k_1 + k_2 + k_3} \quad (5)$$

$$\rho_x = \frac{N r_i^2}{0.5(1.5w_x)^2} \quad (6)$$

ここで、 ρ_x は出口 x 周辺の人口密度、 r_i はエージェント i の半径、 N は出口 x を中心とした半径 $1.5w_x$ の範囲内にあるエージェントの数、 k_1, k_2, k_3 は重みを表している ([5] を参考に設定)。エージェントは周囲の中で最も S_i が大きいエージェントを近傍のエージェントとして選択し、近傍のエージェントと同じ出口から脱出しようとする行動する。

2.2 他エージェントからの反発力

他エージェントからの反発力 \vec{F}_{ij} を以下の式で表す。

$$\vec{F}_{ij} = Ae^{[(r_{ij}-d_{ij})/B]} \vec{n}_{ij} + \gamma g(r_{ij} - d_{ij}) \vec{n}_{ij} + \kappa g(r_{ij} - d_{ij}) \Delta v_{ij}^t \vec{t}_{ij} \quad (7)$$

ここで、 A, B, γ, κ は定数、 d_{ij} はエージェント i と j の距離、 \vec{n}_{ij} はエージェント j から i に向かう単位ベクトル、 r_{ij} はエージェント i エージェント j の半径の合計、 $g(y)$ は y が正ならばそのまま返し負ならば 0 を返す関数である。 \vec{t}_{ij} はエージェント i と j の中心を結んだ線に対して垂直な方向の単位ベクトル、 $\Delta v_{ij}^t = (\vec{v}_j - \vec{v}_i) \cdot \vec{t}_{ij}$ は時刻 t におけるエージェント i と j の \vec{t}_{ij} 方向の速度差である。この力によって、エージェントは他のエージェントと距離を取りパーソナルスペースを保とうとする。

2.3 壁から受ける反発力

壁から受ける反発力 \vec{F}_{io} は以下の式で表す。

$$\vec{F}_{io} = Ae^{[(r_i-d_{io})/B]} \vec{n}_{io} + \gamma g(r_i - d_{io}) \vec{n}_{io} + \kappa g(r_i - d_{io}) (\vec{v}_i \cdot \vec{t}_{io}) \vec{t}_{io} \quad (8)$$

ここで、 d_{io} はエージェント i から壁 o までの距離、 \vec{n}_{io} は壁 o からエージェント i に向かう単位ベクトル、 \vec{t}_{io} は壁 o とエージェント i の接線方向ベクトルである。

2.4 位置更新

前節までの力の合力をエージェントが受ける力として以下のように表す。

$$\vec{F}_i = \vec{F}_d + \sum \vec{F}_{ij} + \sum \vec{F}_{io} \quad (9)$$

エージェント i は出口から脱出するために式 (9) の力 \vec{F}_i を受け、そこから新しい速度 \vec{v}'_i や位置 \vec{P}_i を求める。

$$\vec{v}'_i = \vec{v}_i + \frac{\vec{F}_i}{m_i} \tau_i \quad (10)$$

$$\vec{P}_i = \vec{P}_i^0 + \vec{v}'_i \tau_i \quad (11)$$

ここで、 \vec{v}_i, \vec{P}_i^0 はそれぞれエージェント i の現在の速度と位置である。

3 シミュレーション

3.1 設定

避難する空間は四方に出口があり、出口の広さは下の出口が上左右の出口に比べて2倍の幅を持つ部屋を想定する(図1)¹。また、避難モデル内のパラメー

¹4方向とも出口サイズが同じ避難空間でのシミュレーション結果は、先行研究 [5] から、各出口が均等に利用されることが明らかになっている。

タに関しては [5] を参考に設定した。 $m_i = 80$ [kg], $\tau_i = 0.02$ [s], $r_i = 0.25$ [m], $A = 200$, $B = 0.1$, $\gamma = 2.4 \times 10^3$, $\kappa = 4.8 \times 10^3$, $v^0 = 2.5$ [m/s], $\sigma = 0.26$ である。避難シミュレーションは以下の順序で行われる。

1. 避難エージェントの人数を設定し、各エージェントが事前に出口を把握しているか否かを事前出口把握者の割合に従って決定する。各エージェントの初期位置と速度ベクトルをランダムに決定する。
2. 全出口周辺の密度を式 (6) で求め、全エージェントの持つ情報量を式 (5) で計算する。
3. 全てのエージェントが式 (5) に基づいて近傍のエージェントを選択した後、事前に出口を把握しているエージェントが避難誘導を行う。
4. 各エージェントの合力、速度、位置を式 (9)~式 (11) に基づいて計算し、部屋から出ていたら取り除く。
5. 各パラメータを更新する。
6. エージェントが部屋に残っている場合、2に戻る。
7. 避難完了とし、シミュレーションを終了する。

事前に出口を把握しているエージェントの割合を $0 \sim 1.0$ の間で 0.1 刻み毎にシミュレーションを行い、避難エージェント数は 200 として 1000 回の試行結果を平均したものを結果として採用する。

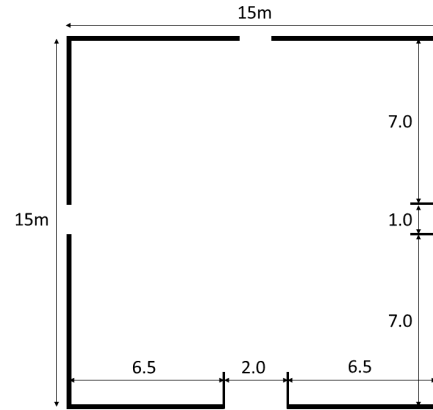


図1: 避難空間. 上左右の出口は1m幅、下が2mの出口幅。全ての出口は各壁面の中央に位置している。

3.2 結果

初めに事前出口把握が及ぼす影響について注目する。図2は事前に出口を把握している人の割合を変化させた際の避難時間の変化を避難誘導がある場合(橙線)とない場合(青線)に分けてプロットしたものである。図2の青線と橙線を見ると、事前把握者の割合が増加するにつれて、どちらの場合も避難時

間が減少している。割合が 0.0 と 1.0 の時を比較すると約 20%避難時間が短縮されている。

この理由を調べるために、事前に出口を把握しているエージェントの割合を変化させた際の各出口の利用エージェント数を調査した(図 3)。まず、避難誘導なしに相当する図 3a を見ると、1.0 未満では全員が出口に近づいた場合を除いて正しい情報を持っていないエージェントが必ず存在するため、出口利用は 1.0 に向かって、「下」は減り続け、「上」は増え続ける。また、事前出口把握者が増加するにつれて出口利用の偏りが減少し、出口の利用が効率化されていることが分かる。このようにエージェントが効率的に避難を行うことによって避難時間が短縮されていると言える。

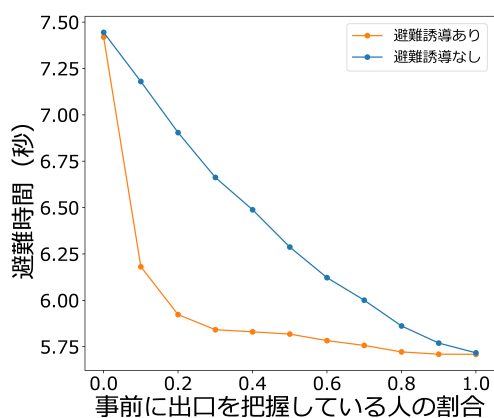


図 2: 事前出口把握による避難時間の変化。

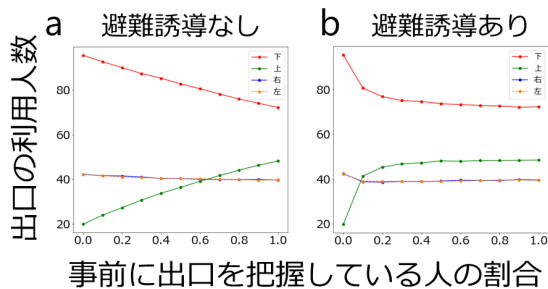


図 3: 避難誘導がない時 (a) とある時 (b) の出口の利用人数の推移。凡例は図 1 の位置に対応。

次に、避難誘導が及ぼす影響について注目する。図 2 の青線と橙線を比較すると、橙線は事前出口把握者の割合が 0.1 付近でより急激に避難時間が減少し、1.0 に向かうにつれて青線に近い避難時間になっている。また、図 3 の a と b を比較すると、図 3b は横軸の値が 0.1 付近になるとより急激に出口利用の偏りが減少し、1.0 に向かうにつれて図 3a に近い値に落ち着いている。以上のことから、事前に出口を把握している人が避難誘導を行い正確な情報を拡散することによって避難誘導を行わない場合に比べて

事前出口把握の効果が増進されることがわかる。また、事前に出口を把握している人の割合が高くなると避難誘導がある場合もない場合も大きな差が見られないことから、避難誘導はあくまで事前出口把握の効果を全体に拡散するだけであると考えられる。

図 3 について、出口幅が同じ「上」と「右・左」を比較すると、事前に出口を把握している人の割合が 1.0 においても、「上」の出口の利用人数が多く均一になっていない。これは、「上」は「下」までの距離が「右・左」に比べて遠いので、「下」に誘引されるエージェントの人数が少ないからであると考えられる。

4 結論

本研究では、情報伝達を行う SF モデルを拡張して避難シミュレーションを行い、事前出口把握と避難誘導が避難時間に及ぼす影響を調査した。その結果、事前出口把握によって出口利用が効率化され避難時間が短縮した。また、避難誘導がある場合には、事前に出口を把握している人の割合が少ない時に最も効果が発揮されることが分かった。

また、部屋のサイズが異なる場合についてはシミュレーションを行わなかったが、出口の大きさが同じであれば本研究のエージェントは理想の速度を保とうとするため、出口を抜ける際の速度は変化しない。そのため最大流量は変わらないため定性的な結果は変わらないと考察する。

参考文献

- [1] Y. Xu, H. Huang, Simulation of exit choosing in pedestrian evacuation with consideration of the direction visual field. *Physica A* **391** (2012) 991–1000.
- [2] D. Helbing, P. Molnár, Social force model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev. E* **51** (1995) 4282–4286.
- [3] D. Helbing, I. Farkas, T. Vicsek, Simulating dynamical features of escape panic. *Nature* **407** (2000) 487–490.
- [4] Y. Qu, Z. Gao, Y. Xiao, X. Li, Modeling the pedestrian's movement and simulating evacuation dynamics on stairs. *Saf. Sci.* **70** (2014) 189–201.
- [5] Y. Han, H. Liu, Modified social force model based on information transmission toward crowd evacuation simulation. *Physica A* **469** (2017) 499–509.